缓释肥对杉木容器苗生长、光合生理和养分积累的影响

李玲燕[1,2,3]，唐 银[1,2,3]，钟明慧[1,2,3]，郑雪燕[4]，许珊珊[1,2,3]，曹光球[1,2,3]，叶义全[1,2,3]

（1. 福建农林大学 林学院, 福州 350002；2. 国家林业和草原局杉木工程技术研究中心, 福州 350002；3. 林木逆境生理生态及分子生物学福建省高校重点实验室，福州 350002；4. 福建省洋口国有林场，福建 南平 353200）

摘　要：为探索杉木容器苗生长、光合特性及养分积累对不同缓释肥用量的响应特征。该文通过设置 6 种不同缓释肥用量处理（0、200、400、800、1 000、1 200 g·m^{-3}），研究不同缓释肥用量对杉木幼苗生长、光合色素含量、叶绿素荧光特性和养分含量的影响，并结合隶属函数法对各生长和生理指标进行综合评价，以期筛选出适合杉木容器苗生长的施肥水平，为杉木优质苗木的高效培育提供参考。结果表明：（1）与对照相比，施用缓释肥可不同程度促进杉木幼苗苗高、地径生长及植株总生物量的积累。（2）缓释肥处理可显著增加杉木叶片叶绿素和类胡萝卜素含量，提高叶片最大荧光（F_m）、可变荧光（F_v）、PS II最大光化学效率（F_v/F_m）、PS II潜在光化学效率（F_v/F_o）和实际量子产量（QY）值。（3）缓释肥处理可不同程度促进杉木幼苗养分的积累，其中锰、铁和锌积累量变化最显著。（4）隶属函数法分析结果表明，当缓释肥用量为 1 000 g·m^{-3} 时其隶属值最大，表明该处理下苗木综合生长状况最好。综上所述，1 000 g·m^{-3} 缓释肥用量是适宜杉木壮苗培育的施肥量，在该处理下通过促进植株体内与光合作用密切相关元素的积累，增加叶片光合色素含量，提高叶片 PS II光化学效率和电子传递速率，进而增强叶片对光能捕获和利用效率，最终改善苗木生长。

关键词：苗木培育，缓释肥，杉木，叶绿素荧光参数，容器苗，苗木质量

中图分类号：Q945.3　　　**文献标识码：** A

Effects of slow-release fertilizer on growth, photosynthetic physiology and nutrient accumulation of container seedlings of *Cunninghamia lanceolata*

LI Lingyan[1,2,3], TANG Yin[1,2,3], ZHONG Minghui[1,2,3], ZHENG Xueyan[4], XU Shanshan[1,2,3], CAO Guangqiu[1,2,3], YE Yiquan[1,2,3]

(1. *College of Forestry*, *Fujian Agriculture and Forestry University*, Fuzhou 350002, China; 2. *Cunninghamia lanceolata Engineering Technology Research Center of State Forestry and Grassland Administration*, Fuzhou 350002, China; 3. *Key Laboratory of Forest Stress Physiology*, *Ecology and Molecular Biology*, Fuzhou 350002, China; 4. *Fujian Yangkou State-owned Forest Farm*, Nanping 353211, Fujian, China)

Abstract: In order to explore the responses of growth, photosynthetic characteristics and nutrient accumulation of *Cunninghamia lanceolata* container seedlings to different amounts of slow-release fertilizer. In this paper, the effects of different amounts of slow-release fertilizer treatments (0, 200, 400, 800, 1 000 and 1 200 g·m^{-3}) on the growth of seedlings height, ground diameters, biomass, photosynthetic pigment content, chlorophyll fluorescence characteristics and nutrient

基金项目：国家重点研发计划项目（2016YFD0600301）；福建省林业科技项目（闽林科便函[2020]29 号）[Supported by National Key Research and Development Project (2016YFD0600301); Fujian Forestry Science and Technology Project (Min Forestry Science Memo [2020]29)]。

第一作者：李玲燕（1997-），硕士研究生，研究方向为森林培育，(E-mail)1543677291@qq.com。

*__通信作者：__叶义全，博士，硕士研究生导师，研究方向为林木逆境生理，(E-mail)yeyiquan008@163.com。

content of *C. lanceolata* seedlings were investigated. Moreover, subordinate function value method was also employed to comprehensive evaluate the growth and physiology indexes of seedlings under different fertilization treatments, and screening suitable slow-release fertilizer levels for the growth of *C. lanceolata* seedlings, which providing reference for the efficiency cultivation of high-quality *C. lanceolata* seedlings. The results were as follows: (1) Compared with the control, the application of slow-release fertilizer could promote the growth of seedling height, ground diameter and the accumulation of total biomass of *C. lanceolata* seedlings to varying degrees. (2) The slow-release fertilizer treatments could significantly increase the contents of chlorophyll and carotenoid in leaves of *C. lanceolata* as compared with control. In addition, slow-release fertilizer treatments also increased the values of maximum fluorescence(F_m), variable fluorescence(F_v), maximum photochemical efficiency of PS II(F_v/F_m), potential photochemical efficiency of PS II(F_v/F_o) and actual quantum yield(QY) to varying degrees when compared with control. (3) The treatments of slow-release fertilizer could promote the nutrient accumulation in seedlings of *C. lanceolata* to varying degrees, among which the contents of Mn, Fe and Zn were found to be changed most significant. (4) The results of subordinate function value method showed that when the amounts of slow-release fertilizer was 1 000 g·m^{-3}, its membership value was the largest, which indicated that the comprehensive growth of seedlings under this treatment was the best. In conclusion, the amount of 1 000 g·m^{-3} slow-release fertilizer is the most suitable treatment for the cultivation of high quality seedlings of *C. lanceolata* in the present study, under this treatment, the growth of *C. lanceolata* seedlings can be improved by increasing the accumulation of nutrient elements closely related to photosynthesis, thus increasing the contents of photosynthetic pigment in leaves, which in turn enhanced the PS II photosynthetic efficiency and electron transfer rate, and ultimately the efficiency of light energy capture and utilization of leaves were enhanced.

Keywords: seedling cultivation, slow-release fertilizer, *Cunninghamia lanceolata*, chlorophyll fluorescence parameters, container seedling, seedling quality

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国南方重要的速生用材树种（叶义全等，2018；饶丽莎等，2021）。据第九次全国森林资源清查结果表明，我国杉木人工林面积和蓄积均居主要人工乔木林树种首位，在保障我国生态安全和木材安全等方面具有重要作用（Kang et al., 2017）。近年来随着杉木人工林造林面积逐年扩大，市场对杉木优质苗木的需求也在不断增加（李茂等，2020a；周岚等，2022）。传统的杉木育苗主要以大田裸根苗为主，但是裸根苗存在苗木出圃率低、起苗易伤根、造林季节短和圃地需轮作等问题，极大增加了育苗成本，降低造林成活率（伊昊，2019）。相对于裸根苗而言，容器苗则能有效克服上述问题（潘平平等，2019），因此容器育苗已成为目前杉木苗木繁育的另一种重要途径。然而由于容器苗的生长空间有限，且所用基质中可供苗木吸收的养分相对较少，无法满足苗木在快速生长过程中对养分的需求，因而施肥是保证杉木容器苗优质生长的关键措施（张培等，2021）。随水施肥是目前容器苗培育普遍采用的一种施肥方式，但这种传统的施肥方式容易导致肥料和水的浪费，降低苗木对养分的利用效率，增加生产成本，甚至还可能引起环境污染（李小茹等，2017）。因此，开展杉木容器苗施肥技术研究对于提高苗木质量，进而增强苗木抗逆性，改善造林效果具有重要意义。

作为一种新型肥料，缓释肥具有养分利用效率高，挥发、淋溶少以及肥效长等特点，近年来在苗木培育中的应用日趋广泛（魏红旭等，2011；王艺等，2013；吴小林等，2014；历月桥等，2021）。潘平平等（2019）在薄壳山核桃容器苗生长对不同缓释肥用量响应研究中发现，施用 3 kg·m^{-3} 的缓释肥能有效促进薄壳山核桃生长和根系发育，这与缓释肥改

善植株 N、P、K 养分状况密切相关。姚光刚等（2019）研究表明，从养分利用率和成本来看，0.95 $g\cdot L^{-1}$ 的缓释肥能有效促进槲栎容器苗苗高、地径的生长，增加生物量和养分含量的积累。在白木香容器苗研究中也发现当缓释肥用量为 2.5 $kg\cdot m^{-3}$ 时容器苗生长效果最优，其苗高、地径和生物量等指标均显著高于其他处理（庞圣江等，2018）。类似地，宋协海等（2018）通过研究不同缓释肥用量对黄连木生长和养分积累影响中发现，低水平的缓释肥用量有利于根系生长，随着施肥量的增加植株茎叶的生长得到显著改善，并在缓释肥用量为 1.6 $kg\cdot m^{-3}$ 时其苗高、地径和生物量达到最大值。可见，不同树种之间由于生物学特性的差异，最适宜其容器苗生长的缓释肥用量也存在较大差别，因此开展杉木容器苗生长对不同用量缓释肥响应规律的研究，对于实现苗木优质、精准和高效培育具有重要的理论和现实意义。

尽管以往关于杉木苗木施肥的研究较多，但主要集中在常规施肥、配方施肥和指数施肥等方面（刘欢等，2016；任衍敏等，2021；李茂等，2021）。有关缓释肥对杉木容器苗生长的研究相对较少（尚斌，2017；周新华等，2017），其生长对缓释肥用量的响应机制尚不完全清楚。另一方面，近年来随着一些杉木高世代良种材料如优良无性系‘洋-061’在全国推广，显著提升了我国杉木人工林的良种化水平和经济效益，然而与高世代优良材料相配套的苗木培育技术体系尚未建立（朱晗等，2018；李茂等，2020b）。如前所述，不同的杉木优良材料因其自身生物学特性的差异，它们对养分的需求也不尽相同（魏宁等，2021），而且优良材料对育苗技术的要求相对较高，传统的育苗技术已无法适应这些良种对生长的需求（朱晗等，2018）。因此，开展与杉木优良材料相匹配的缓释肥施用技术研究，对实现杉木优质材料的高效培育具有重要意义。鉴于此，本研究以杉木优良无性系‘洋-061’为研究对象，研究不同缓释肥施用量对杉木轻型基质容器幼苗生长、生物量积累、光合色素合成、叶绿素荧光参数以及植株养分含量的影响，同时利用隶属函数法对各生理指标进行综合分析，拟探讨以下问题：（1）杉木幼苗生长、光合和养分积累对不同缓释肥施用量的响应规律如何？（2）最适‘洋-061’生长的缓释肥施用量是多少以及适宜的缓释肥用量通过何种途径改善苗木生长？以期为杉木优质苗木的高效培育提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于福建农林大学金山校区田间实验大棚（119°13′ E、26°05′ N）。该地区海拔 10 m，年平均温度 25 ℃，亚热带季风气候，年平均日照 1 700~1 980 h，年平均降水量 900~2 100 mm，无霜期 326 d。

1.2 试验材料来源

扦插用的穗条由福建省洋口国有林场提供的长势一致的‘洋-061’当年生穗条，长度为（10±0.4）cm。轻型基质泥炭土、珍珠岩和杉木皮采购于南平市森科种苗有限公司，购买回来后将轻型基质按泥炭土、珍珠岩和杉木皮按 1:2:2（V:V:V）比例进行充分混合，混合后的轻型基质化学性质见表 1。缓释肥为美国爱贝施缓释肥，全氮含量 180 $g\cdot kg^{-1}$、全磷含量 60 $g\cdot kg^{-1}$、全钾含量 120 $g\cdot kg^{-1}$。

表 1 轻型基质基本化学性质

Table 1 Basic chemical properties of light matrix

全氮 Total nitrogen（$g\cdot kg^{-1}$）	水解氮 Hydrolyzed nitrogen（$g\cdot kg^{-1}$）	有效磷 Available phosphorus（$g\cdot kg^{-1}$）	速效钾 Available potassium（$g\cdot kg^{-1}$）	镁 Mg（$g\cdot kg^{-1}$）	钙 Ca（$g\cdot kg^{-1}$）	锰 Mn（$g\cdot kg^{-1}$）	铁 Fe（$g\cdot kg^{-1}$）	有机质 Organic matter（$g\cdot kg^{-1}$）
9.93±0.09	0.26±0.02	0.64±0.02	11.33±0.13	5.32±0.84	5.97±1.55	0.27±0.02	13.97±2.71	295.15±8.04

1.3 试验设计

2019 年 4 月中旬在按泥炭土、珍珠岩、杉木皮 1:2:2（V:V:V）比例充分混合的轻型基质中添加不同量的缓释肥。试验共设置 6 个处理，分别为 CK（0 g·m^{-3}）、T1（200 g·m^{-3}）、T2（400 g·m^{-3}）、T3（800 g·m^{-3}）、T4（1 000 g·m^{-3}）、T5（1 200 g·m^{-3}）。轻型基质与缓释肥充分混合后装入无纺布袋（直径 6 cm×高 10 cm）中备用。随后将无纺布袋置于塑料托盘上，把采回的穗条扦插至不同的轻型基质中，每袋扦插 1 株苗，每个处理扦插 300 株。2019 年 5 月中旬从每个处理扦插的 300 株苗中挑选出扦插成活，长势良好且一致的幼苗共 90 株，每个重复 30 株，每个处理 3 次重复，6 个处理共 540 株苗，进行不同缓释肥施肥培养试验。苗木培养期间进行正常的水分和除草管理。2020 年 11 月中旬试验结束，进行取样测定。

1.4 样品取样与测定

1.4.1 生长量、生物量及苗木质量指数测定

2020 年 11 月中旬用游标卡尺和直尺分别测量苗木地径和苗高，计算各重复的平均地径及平均树高，依据平均值每个重复选出 3 株标准株。将标准株按根、茎、叶分别剪下，于 105 ℃杀青 2 h，随后在 75 ℃下烘干至恒重，根据朱晗等（2018）方法计算苗木质量指数。

苗木质量指数=苗木总干质量/（苗高/地径+地上干质量/地下干质量）（1）

1.4.2 光合色素含量测定

选取标准株上部第一轮生枝条中部当年生的健康成熟叶片测定光合色素。光合色素的提取采用乙醇丙酮法（Lin et al., 2016）。提取结束后，吸取 200 μL 提取液置于酶标板中，分别于 470、645、663 nm 处测吸光度(A470、A645、A663)，每个处理重复 3 次。

叶绿素 a 含量(Ca)=(12.7×A663-2.69×A645)×提取液体积×稀释倍数/样品质量（2）

叶绿素 b 含量(Cb)=(22.88×A645-4.76×A663)×提取液体积×稀释倍数/样品质量（3）

叶绿素总量=(20.29×A645+8.04×A663)×提取液体积×稀释倍数/样品质量（4）

类胡萝卜素含量=(1000×A470-3.27×Ca-104×Cb)/229（5）

1.4.3 叶绿素荧光参数测定

利用 PAM-2500 便携式叶绿素荧光仪（Walz，Germany）对选出的标准株上部第一轮生枝条中部当年生的健康成熟叶片，根据陶文文等（2011）方法开展叶绿素荧光参数测定，相关荧光参数指标按照 Baker（2008）的方法进行计算。

1.4.4 养分含量测定

将经杀青、烘干后的根、茎、叶等样品研磨至粉状，过 0.149 mm 的细筛，利用微波高压消解法对样品进行消解，采用电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS）对样品元素（Mg、P、K、Ca、Mn、Fe、Zn）的含量进行检测。

1.5 数据处理

本试验采用 Excel 2019 进行数据统计，利用隶属函数法综合评价不同处理杉木幼苗的生长性，其中若某一指标与生长呈正相关，则其隶属函数值=$(X_i-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$，若为负相关则其隶属函数值=$1-(X_i-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$，式中：$X_i$ 为某一指标测定值；X_{max} 为该指标实际测定的最大值；X_{min} 为该指标实际测定的最小值（戴昀等，2021）。用 SPSS 26.0 对数据进行单因素分析，不同处理平均值间采用 LSD 比较进行检验，作图采用 Origin 8.5 软件。

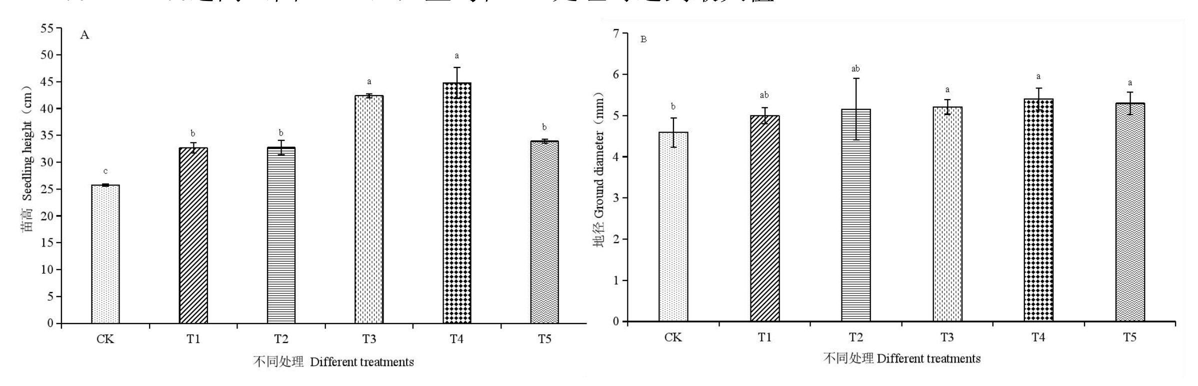
2 结果与分析

2.1 不同缓释肥施用量对杉木幼苗生长的影响

2.1.1 不同缓释肥施用量对杉木幼苗地径和苗高生长的影响

不同用量缓释肥处理均能促进杉木幼苗苗高和地径生长（图 1）。与 CK 相比，不同

缓释肥处理下杉木幼苗苗高增幅介于 26.94%~73.83%之间（图 1：A），地径增幅介于 8.79%~17.79%之间（图 1：B），且均在 T4 处理时达到最大值。



柱状图上不同字母表示不同处理之间的显著性（P<0.05）。下同。

Different letters above histograms indicate the significance between different treatments (P<0.05). The same as below.

图 1 不同缓释肥施用量对杉木幼苗苗高与地径生长的影响

Fig. 1 Effects of different slow-release fertilizer application rates on the growth of seedling height and ground diameter of *Cunninghamia lanceolata* seedlings

2.1.2 不同缓释肥施用量对杉木幼苗生物量积累的影响

如表 2 所示，随着施肥量增加，杉木幼苗根、茎、叶和植株总生物量整体上呈增长趋势，其中茎和植株总生物量则呈现先增长后降低趋势。就根生物量而言，仅 T4 和 T5 处理根系生物量高于 CK。与 CK 相比，除 T1 处理叶生物量低于 CK 以外，其余处理的茎、叶和植株总生物量增幅分别介于 12.23%~122.28%、5.07%~108.57%以及 1.27%~85.00%之间，且均在 T4 处理时为最大值。

表 2 不同缓释肥施用量对杉木幼苗生物量积累的影响

Table 2 Effects of different slow-release fertilizer application rates on biomass accumulation of *Cunninghamia lanceolata* seedlings

处理 Treatment	根生物量 Root biomass（g）	茎生物量 Stem biomass（g）	叶生物量 Leaf biomass（g）	植株总生物量 Total plant biomass （g）
CK	1.27±0.51ab	1.38±0.30c	2.24±0.83b	4.46±0.88b
T1	0.90±0.17b	1.62±0.22bc	1.99±0.17b	4.51±0.35b
T2	1.20±47b	1.55±0.23bc	2.35±0.67b	5.09±1.38b
T3	1.24±0.48b	2.44±0.35ab	3.60±0.93ab	6.47±0.98ab
T4	1.73±0.34a	3.06±0.38a	4.67±1.40a	8.24±1.43a
T5	2.01±0.30a	2.21±0.38b	3.49±0.41ab	7.72±0.87a

注：表中不同字母表示不同处理之间的显著性（P<0.05）。下同。

Note: Different letters in the table indicate the significance between different treatments (P<0.05). The same as below.

2.1.3 不同缓释肥施用量对杉木幼苗苗木质量指数的影响

由图 2 可知，不同缓释肥施用量对杉木幼苗苗木质量指数存在显著影响（P<0.05）。与 CK 相比，随着施用量的增加，杉木幼苗苗木质量指数呈先降后升的趋势，苗木质量指数大小顺序为 T5＞T4＞T3＞CK＞T2＞T1，其中 T3、T4 和 T5 处理分别较 CK 增加了 9.25%、44.34%和 60.08%。

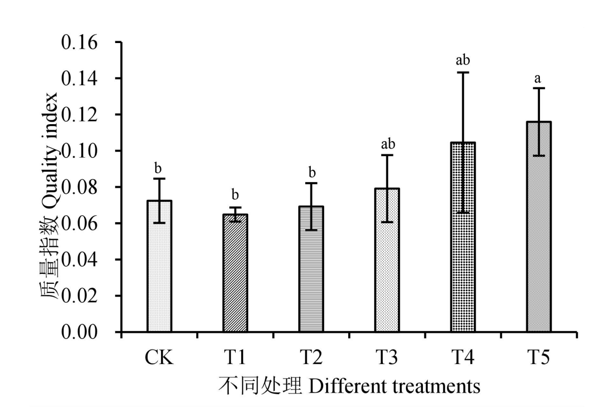


图 2 不同缓释肥施用量对杉木苗木质量指数的影响

Fig. 2 Effects of different slow-release fertilizer application rates on seedling quality index of *Cunninghamia lanceolata* seedlings

2.2 不同缓释肥施用量对杉木幼苗叶片光合色素含量的影响

施用缓释肥可有效促进幼苗光合色素含量的积累（表 3）。与 CK 相比，不同处理显著增加杉木幼苗叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素和叶绿素总含量（P<0.05），T5 处理时叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总含量达最大值，而类胡萝卜素含量在 T4 处理时达最大值。叶绿素 a/叶绿素 b 随着施用量的增加呈先升后降的趋势，但不同处理之间差异不显著（P>0.05）。

表 3 不同缓释肥施用量对杉木幼苗叶片光合色素含量的影响

Table 3 Effects of different slow-release fertilizer application rates on photosynthetic pigment content in leaves of *Cunninghamia lanceolata* seedlings

处理 Treatment	叶绿素 a Chlorophyll a （mg·g^{-1}）	叶绿素 b Chlorophyll b （mg·g^{-1}）	总叶绿素 Total chlorophyll （mg·g^{-1}）	叶绿素 a/叶绿素 b Chlorophyll a /Chlorophyll b	类胡萝卜素 Carotenoid （mg·g^{-1}）
CK	0.65±0.12c	0.38±0.02c	1.04±0.25c	1.72±0.10a	0.06±0.005c
T1	1.04±0.12b	0.58±0.05b	1.63±0.16b	1.79±0.14a	0.11±0.002b
T2	0.94±0.15b	0.52±0.04b	1.46±0.29bc	1.82±0.23a	0.11±0.008b
T3	0.95±0.12b	0.51±0.06b	1.47±0.18b	1.85±0.03a	0.11±0.006b
T4	1.13±0.07ab	0.59±0.08b	1.72±0.15b	1.92±0.16a	0.14±0.009a
T5	1.29±0.08a	0.75±0.04a	2.04±0.11a	1.68±0.10a	0.12±0.009ab

2.3 不同缓释肥施用量对杉木容器幼苗叶绿素荧光参数的影响

由表 4 可知，随着缓释肥施用量的增加，杉木叶片初始荧光（F_o）值、非光化学淬灭系数（NPQ）值总体呈逐渐下降的趋势；与 CK 相比，不同处理 F_o 值降幅介于 17.38%~23.73%之间，NPQ 值降幅介于 13.28%~53.63%之间。不同缓释肥施用量处理可不同程度提高杉木叶片最大荧光（F_m）、可变荧光（F_v）、PS II潜在光化学效率（F_v/F_o）和 PS II最大光化学效率（F_v/F_m），且均在 T4 处理时达最大值。方差分析结果表明，T4 处理的 F_o、NPQ、F_m、F_v、F_v/F_o 与 CK 之间差异显著，而不同处理对杉木幼苗叶片 F_v/F_m、实际量子产量（QY）和光化学淬灭系数（Qp）的影响差异不显著（P>0.05）。

表 4 不同缓释肥施用量对杉木幼苗叶绿素荧光参数的影响

Table 4 Effects of different slow-release fertilizer application rates on chlorophyll fluorescence parameters of *Cunninghamia lanceolata* seedlings

处理 Treatment	初始荧光 F_o	最大荧光 F_m	可变荧光 F_v	PS II最大光化学效率 F_v/F_m	PS II潜在光化学效率 F_v/F_o	实际量子产量 QY	光化学淬灭系数 Qp	非光化学淬灭系数 NPQ
CK	94.89±2.99a	393.21±49.06b	298.33±48.81c	0.76±0.025a	3.14±0.69c	0.81±0.02a	0.60±0.027a	1.36±0.13ab

T1	78.40±8.49b	416.16±42.87b	337.76±34.38bc	0.81±0.001a	4.31±0.05b	0.82±0.002a	0.57±0.028a	1.18±0.31ab
T2	74.79±7.67b	419.94±45.49b	345.15±38.12bc	0.82±0.005a	4.62±0.16b	0.82±0.006a	0.60±0.034a	0.96±0.18bc
T3	76.88±6.98b	461.47±20.50b	384.60±13.84b	0.83±0.008a	5.00±0.27b	0.83±0.008a	0.57±0.005a	0.98±0.10b
T4	72.37±9.02b	532.82±35.79a	460.44±35.55a	0.86±0.026a	6.36±0.75a	0.81±0.02a	0.56±0.03a	0.63±0.16c
T5	75.57±4.85b	428.50±27.13b	352.94±22.32bc	0.82±0.001a	4.67±0.04b	0.82±0.002a	0.59±0.009a	1.62±0.30a

2.4 不同缓释肥施用量对杉木幼苗养分含量的影响

除施肥量较低的 T1 处理中 Ca 元素外，其余施肥处理均不同程度地促进‘洋-061’幼苗各元素含量的积累（图 3）。与 CK 相比，不同施肥处理下杉木幼苗 P、K、Mg 含量增幅分别介于 29.50%~103.65%、22.92%~80.06%及 14.52%~74.07%之间，且均在 T4 处理达最大值。随着施肥量的增加，Ca 积累量呈先降后升的变化趋势，并在 T5 处理达最大值。就微量元素而言，Mn、Fe 和 Zn 含量均在 T4 处理达到最大值，与 CK 相比分别增加 157.14%、216.39%和 238.08%。

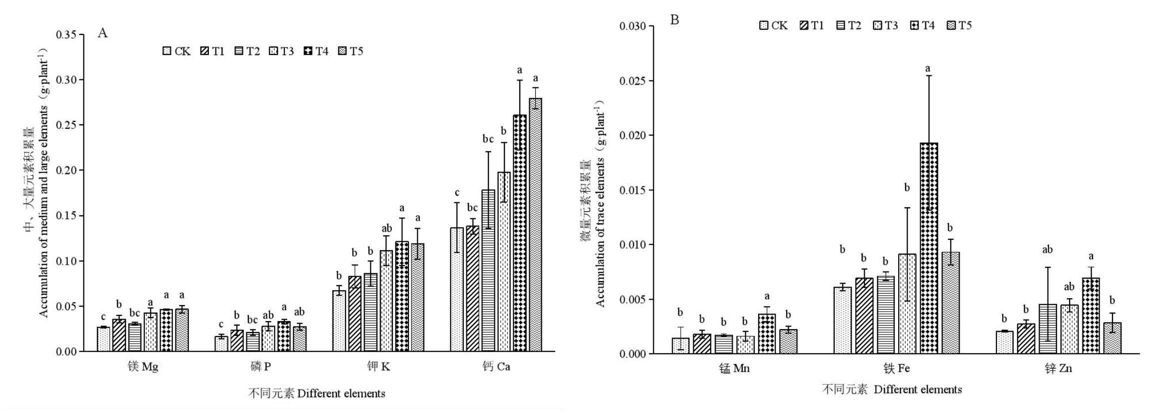


图 3 不同缓释肥施用量对杉木幼苗元素积累量的影响

Fig.3 Effects of different slow-release fertilizer application rates on element accumulation of *Cunninghamia lanceolata* seedlings

2.5 基于隶属函数法的杉木幼苗生长和生理相关指标综合分析

苗木生长状况是一个综合性的性状，单纯用某一生长指标来衡量其生长情况的好坏有失偏颇，而采用多个指标对苗木生长情况进行综合评价，能准确反映出苗木的生长状况。因此，本研究采用隶属函数法对不同处理下杉木幼苗生长指标、光合色素含量和叶绿素荧光参数进行综合评价。由表 5 可知，杉木幼苗生长综合评价指数大小顺序为 T4＞T5＞T3＞T2＞T1＞CK。

表 5 苗木生长综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of seedlings growth

处理 Treatment	苗高 Seedling height	地径 Ground diameter	植株生物量 Plant biomass	苗木质量指数 Seedling quality index	叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content	叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content	叶绿素总含量 Total chlorophyll content	类胡萝卜素含量 Carotenoid content	初始荧光 F_o	最大荧光 F_m	可变荧光 F_v	PS II 最大光化学效率 F_v/F_m	PS II 潜在光化学效率 F_v/F_o	非光化学淬灭系数 NPQ	隶属值 Membership value	排序 Sort
CK	0.21	0.01	0.19	0.17	0.09	0.07	0.09	0.19	0.17	0.24	0.28	0.55	0.42	0.29	0.21	6
T1	0.43	0.34	0.21	0.07	0.55	0.54	0.56	0.53	0.23	0.34	0.37	0.70	0.53	0.30	0.41	5
T2	0.52	0.34	0.21	0.25	0.29	0.25	0.28	0.54	0.33	0.35	0.40	0.70	0.64	0.58	0.42	4
T3	0.56	0.80	0.52	0.27	0.44	0.38	0.43	0.52	0.29	0.53	0.58	0.73	0.67	0.45	0.51	3
T4	0.67	0.91	0.85	0.62	0.64	0.56	0.63	0.72	0.79	0.84	0.85	0.86	0.83	0.77	0.77	1
T5	0.60	0.40	0.60	0.77	0.83	0.93	0.88	0.62	0.25	0.39	0.43	0.55	0.64	0.05	0.57	2

3 讨论

施肥是苗木培育的关键环节，科学合理施肥不仅能有效减少养分的损失，提高肥料的利用效率，而且还能提高苗木质量，降低生产成本。缓释肥因其具有肥效长且释放稳定等特点，能够通过调节养分释放速度来实现与植物养分吸收的同步，从而大幅提高植物对养分的利用效率（潘平平等，2019；张富鑫等，2021）。目前通过在轻型基质中添加缓释肥开展容器苗培育的研究报道较多。研究表明在薄壳山核桃（潘平平等，2019）、槲栎（姚光刚等，2019）、白木香（庞圣江等，2018）、黄连木（宋协海等，2018）、木荷（马雪红等，2010）、赤皮青冈（吴小林等，2014）等容器苗培育基质中施加 0.95~3.50 kg·m^{-3}的缓释肥能有效促进容器苗的生长，可见不同的植物种类最适宜其生长缓释肥用量存在较大差异，这可能也与所施用的缓释肥种类以及基质类型等因素有关，因此开展容器苗施肥技术研究对于促进苗木生长，提高苗木质量具有重要意义。本研究比较了 0.2~1.2 kg·m^{-3}缓释肥对杉木优良无性系‘洋-061’生长的影响，发现施用缓释肥可明显促进‘洋-061’苗高和地径的生长以及生物量的积累，但当缓释肥用量达到 1.2 kg·m^{-3}时，苗木生长相关指标出现不同程度下降。该结果与楼君（2015）和孟庆银等（2020）关于施肥对容器苗生长的研究结果相类似，表明在一定范围内随着肥料用量的增加可以促进苗木的生长，而过量施肥则可能会对幼苗的生长产生一定的抑制作用。苗木质量指数是衡量苗木质量的重要指标（柏小娟等，2018）。本研究中，施用缓释肥可不同程度提高杉木幼苗苗木质量，但仅 T5 和 CK 之间存在显著差异，这与李茂等（2020a）的研究结果类似。导致这种现象的可能原因有以下 2 个：第一，由于研究所使用的无纺布当根系长满布袋后继续生长会发生“空气修根”现象，因此无法进一步促进基质苗根系生长，增加根系生物量。由于容器袋空间较小，在苗木培育后期，不同处理苗木根系基本都能长满整个袋，导致不同处理根系生物量差异较小，从而对苗木质量指数这一指标产生一定的干扰。第二，本研究中采用较小容积的无纺布袋也可能造成根系穿透布袋与空气进行养分和水分交换，且随着雨水的淋容作用可能出现部分养分流失的情况，进而对实验结果造成一定的影响，具体的原因仍有待进一步研究。

光合作用是植物碳同化产物的主要能量来源，也是植物生长的物质基础，因此植物的生长快慢与其光合能力密切相关（唐洁等，2014）。众所周知，叶绿素是保证植物光合作用正常进行的主要物质，它在光能捕获、传递和转换中扮演关键角色，因此植物的光合能力与光合色素含量密切相关（谢辉等，2021）。施肥提高植物光合能力很大程度上与其增加叶片光合色素含量有关。本研究发现，与 CK 相比，随着缓释肥施用量的增加杉木叶片叶绿素含量和类胡萝卜素含量均呈显著增加的趋势，这与李茂等（2020b）的研究结果类似，说明施肥可通过提高叶片光合色素含量，增强植株光合能力。除叶绿素含量外，叶绿素 a/b 值也常与光合色素含量一起用于表征植物对光能利用率的高低（王亚楠等，2020）。当叶绿素含量和 a/b 值同时增加时，植物叶片的光能利用效率是增强的（闫萌萌等，2014）。本研究中我们发现施肥处理均能不同程度提高叶绿素 a/b 值，因此上述结果共同表明，施用缓释肥可通过提高叶片光合色素含量和叶绿素 a/b 值来增强叶片对光能的吸收能力，进而将更多光能用于光合作用，最终达到促进植物生长的目的，这也与上述生长和生物量结果相一致。

叶绿素荧光参数主要用于表征叶片光系统对光能的吸收、传递、耗散和分配的内在特征，常用于研究胁迫条件下植物光能利用能力的变化（岑海燕等，2018）。与 CK 相比，施用缓释肥显著降低杉木叶片的初始荧光（F_o）值。F_o值下降说明杉木叶片类囊体膜受到的损害较小，能较好地维持 PS II反应中心的活性（黄秋娴等，2015）。这可能与施肥改善植株叶片养分，避免叶片因养分缺乏胁迫引起活性氧积累，进而减轻活性氧对光合结构的破坏有关（李茂等，2020b）。最大荧光（F_m）、可变荧光（F_v）、PS II最大光化学效率

（F_v/F_m）和 PS II潜在光化学效率（F_v/F_o）值，这些指标主要用于表征 PS II反应中心活性、电子传递能力和效率（李晓等，2006）。随着施肥量的增加杉木叶片上述荧光值呈先升后降趋势，在 T4 处理下达到最大值。上述荧光值的增加有利于提高叶片将吸收的光能转化为化学能的速度和效率，为叶片碳同化过程提供更多的能量，从而增强叶片对光能利用效率。类似研究结果在银叶树（张卫强等，2021）和柳枝稷（何海锋等，2020）中也有发现，说明提高叶片对光能的利用率，促进碳同化产物的合成是施缓释肥促进苗木生长的光合生理基础。此外，研究表明植物叶片 F_v/F_m 值通常维持在 0.80~0.85 之间，胁迫会导致该值出现不同程度的下降（李茂等，2020b）。与施肥处理相比，不施肥对照该值明显低于 0.80，表明在不施肥条件下，植株可能遭受了养分胁迫，从而发生光抑制现象。非光化学淬灭（NPQ）是植物叶片光合机构的一种自我保护机制，通过将植物吸收的多余光能以热能形式耗散，防止过剩光能对光合机构造成破坏（李晓等，2006）。除 T5 外，其他施肥处理的 NPQ 值均显著低于 CK，暗示适量施肥处理可以有效减少以热能形式耗散的光能，而将吸收的更多光能用于光合碳同化过程，进而提高叶片对光能的利用率，促进碳同化产物的积累，而养分胁迫和过量施肥处理叶片吸收的光能更多是以热能形式耗散掉，保护光合机构免受伤害，从而减少了进入光合碳同化产物过程的光能。因此，在 T5 处理下杉木幼苗苗高和总生物量出现下降，部分原因可能由于过量施肥引起叶片光能利用效率出现一定程度下降引起的。

施肥处理除了对生长和光合生理有影响外，它还能促进植株养分元素的积累。与 CK 相比，施用缓释肥均能不同程度促进杉木幼苗植株养分元素的积累，尤其是微量元素含量的变化趋势更为显著，但当缓释肥过量时，苗木养分的含量则出现一定程度的下降，但仍高于 CK 处理。这与魏红旭等（2011）关于长白山落叶松容器苗养分库构建的研究以及肖遥等（2015）对关于缓释肥加载对红豆杉、浙江楠和浙江樟容器苗生长和 N、P 库构建的研究结果类似，可能原因在于过量施肥引起基质中养分元素浓度超过某一阈值时，对杉木苗木生长产生一定的离子毒害，从而抑制其对养分的吸收造成的（潘平平等，2019），但具体原因仍有待进一步研究。值得注意的是，在适量施肥条件下，植株养分元素含量，特别是与光合密切相关的养分元素含量，如镁（Mg）、钾（K）、磷（P）、铁（Fe）、锌（Zn）等均显著高于不施肥对照处理。这可能与这些元素作为光合色素的重要组成成分或参与光合作用的重要过程，通过提高这些养分元素的含量，能增强叶片对光能的捕获和转化能力，从而达到提高植物光合作用能力，促进生长的目的。这与上述叶绿素荧光的结果相一致，说明适宜施肥提高杉木叶片光能利用率可能与其改善植株养分元素状况，特别是改善植株体内与光合作用密切相关的养分元素有关。

4 结论

利用隶属函数法综合生长、光合生理相关指标最终确定缓释肥施用量为 1 000 g·m^{-3} 是适合杉木优良无性系‘洋-061’幼苗生长的适宜用量。该处理下杉木幼苗通过增加叶片光合色素含量，提高叶片对光能的捕获和吸收能力，同时通过促进植株中与光合作用密切相关元素的积累，提高叶绿素荧光 F_m、F_v、F_v/F_m 和 F_v/F_o 值，增强叶片光能利用效率，进而促进光合碳同化产物的积累，最终促进苗木的生长。

参考文献：

BAI XJ, LU JG, LI XR, et al., 2018. The effects of container size and growing medium on the growth *Calycanthus floridus* seedlings[J]. J Anhui Agric Univ, 45(3): 462-467. [柏小娟，芦建国，李小茹，等，2018. 基质配比对美国蜡梅容器苗生长的影响[J]. 安徽农业大学学报，45(3)：462-467.]

BAKER NR, 2008. Chlorophyll fluorescence: a probe of photo-synthesis in vivo[J]. Ann Rev Plant Biol, 59(1): 89-113.

CEN HY, YAO JN, WENG HY, et al., 2018. Applications of chlorophyll fluorescence in plant phenotyping: a review[J]. Spectrosc Spectr Anal, 38(12): 3773-3779. [岑海燕，姚洁妮，翁海勇，等，2018. 叶绿素荧光技术在植物表型分析的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析，38(12)：3773-3779.]

DAI Y, YUAN LY, ZHANG SJ, et al., 2021. Changes of photosynthetic fluorescence and evaluation of cold tolerance in Wucai (*Brassica campestris* L.) under low temperature stress[J]. Mol Plant Breed, 19(2): 622-631. [戴昀，袁凌云，张淑江，等，2021. 低温胁迫下不同乌菜光合及荧光特性的变化及耐寒性评价[J]. 分子植物育种，19(2)：622-631.]

HE HF, YAN CH, WU N, et al., 2020. Effects of nitrogen application rate on chlorophyll fluorescence characteristics and dry matter accumulation in switchgrass (*Panicum virgatum*) leaves[J]. Acta Pratacult Sin, 29(11): 141-150. [何海锋，闫承宏，吴娜，等，2020. 施氮量对柳枝稷叶片叶绿素荧光特性及干物质积累的影响[J]. 草业学报，29(11)：141-150.]

HUANG QX, ZHAO S, LIU CM, et al., 2015. Effects of shading treatments on chlorophyll fluorescence characteristics of *Sabina vulgaris* Seedlings grown in iron tailings media[J]. Sci Silv Sin, 51(6): 17-26. [黄秋娴，赵顺，刘春梅，等，2015. 遮荫处理对铁尾矿基质臭柏实生苗快速叶绿素荧光特性的影响[J]. 林业科学，51(6)：17-26.]

KANG HJ, SEELY B, WANG GY, et al., 2017. Simulating the impact of climate change on the growth of *Cunninghamia lanceolata* plantations in Fujian province, China[J]. New Zealand J For Sci, 47(1): 20.

LI M, HONG K, XU SS, et al., 2020a. Effects of exponential fertilization on *Cunninghamia lanceolata* superior clone seedling growth and nutrient content[J]. Chin J Appl Environ Biol, 26(6): 1490-1497. [李茂，洪凯，许珊珊，等，2020a. 指数施肥对杉木优良无性系幼苗生长和养分含量的影响[J]. 应用与环境生物学报，26(6)：1490-1497.]

LI M, REN ZB, ZHENG MM, et al., 2020b. Effects of exponential fertilization on the growth and photosynthetic characteristics of the superior clone of *Cunninghamia lanceolata*[J]. Chin J Appl Environ Biol, 26(2): 400-409. [李茂，任正标，郑鸣鸣，等，2020b. 指数施肥对杉木优良无性系生长和光合特性的影响[J]. 应用与环境生物学报，26(2)：400-409.]

LI M, LIN KM, ZHENG MM, et al., 2021. Effects of nitrogen fertilization on microbial functional diversity in a light-medium for *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook seedlings[J]. Chin J Appl Environ Biol, 27(1): 54-61. [李茂，林开敏，郑鸣鸣，等，2021. 指数施肥对杉木苗期基质中微生物功能多样性的影响[J]. 应用与环境生物学报，27(1)：54-61.]

LIU H, WANG CQ, WU JS, et al., 2016. Effects of exponential N fertilization on the growth and nutrient content in clonal *Cunninghamia lanceolata* seedlings[J]. Chin J Appl Ecol, 27(10): 3123-3128. [刘欢，王超琦，吴家森，等，2016. 氮素指数施肥对杉木无性系苗生长及养分含量的影响[J]. 应用生态学报，27(10)：3123-3128.]

LIU KL, SUN XY, ZHAO TR, et al., 2007. Leaf nutrients(N, P, K, Ca and Mg) in selected *Populus tomentosa* triploid clones[J]. J Zhejiang For Coll, 24(3): 297-301. [刘克林，孙向阳，赵铁蕊，等，2007. 三倍体毛白杨不同无性系叶片营养元素质量分数差异[J]. 浙江林学院学报，24(3)：297-301.]

李旭，王宇，隋鑫，等，2017. 缓释肥与速效氮肥混施对机插水稻生长发育及氮肥利用率的影响[J]. 江苏农业科学，45(6)：45-48.

LI X, FENG W, ZENG XC, 2006. Advances in chlorophyll fluorescence analysis and its uses[J].

Acta Bot Boreal-Occident Sin, (10): 2186-2196. [李晓，冯伟，曾晓春，2006. 叶绿素荧光分析技术及应用进展[J]. 西北植物学报，(10)：2186-2196.]

LI XR, LU JG, BAI XJ, 2017. Effects of slow-release fertilizer with different N, P and K ratios on the growth of potted *Sinocalycanthus chinensis* and *Calycanthus floridus* seedlings[J]. J Anhui Agric Univ, 44(1): 55-59. [李小茹，芦建国，柏小娟，2017. 不同氮磷钾配比缓释肥对夏蜡梅、美国蜡梅容器苗生长的影响[J]. 安徽农业大学学报，44(1)：55-59.]

LI YQ, HE P, ZHOU XH, et al., 2021. Effects of substrate ratio, amount of slow-release fertilizer and container standard on container seedling of *Lithocarpus litseifolius*[J]. J NE For Univ, 49(6): 46-52. [厉月桥，何平，周新华，等，2021. 基质配比、缓释肥用量和容器规格对多穗柯容器育苗的影响[J]. 东北林业大学学报，49(6)：46-52.]

LOU J, 2015. Nutrition loading research for container seeding of 5 important *Precious* tree species[D]. Beijing: Chinese Acadmy Forestry. [楼君，2015. 浙江楠等 5 种珍贵树种容器苗养分有效加载研究[D]. 北京：中国林业科学研究院.]

MA XH, HU GC, FENG JG, et al., 2010. Comparison on the substrate and container size of container nursery of *Schima superba*[J]. For Res, 23(4): 505-509. [马雪红，胡根长，冯建国，等，2010. 基质配比、缓释肥量和容器规格对木荷容器苗质量的影响[J]. 林业科学研究，23(4)：505-509.]

MENG QY, HONG YC, WANG YS, et al., 2020. A comparative study on afforestation growth of container seedlings of *Cunninghamia lanceolata* with exponential fertilization[J]. S Chin For Sci, 48(5): 33-36. [孟庆银，宜聪，王雨水，等，2020. 指数施肥杉木实生容器苗造林生长对比研究[J]. 南方林业科学，48(5)：33-36.]

PAN PP, DOU QQ, TANG WH, et al., 2019. Effects of slow release fertilizer dosage on growth and nutrient contents of *Carya illinoensis container* seedlings[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 43(5): 163-168. [潘平平，窦全琴，汤文华，等，2019. 缓释肥用量对薄壳山核桃容器苗生长及养分含量的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，43(5)：163-168.]

PANG SJ, ZHANG P, MA Y, et al., 2018. Effect of substrate ratio and slow-release fertilizer dose on the growth of containerized *Aquilaria sinensis* seedlings[J]. J NE For Univ, 46(11): 12-15. [庞圣江，张培，马跃，等，2018. 白木香容器苗基质配比与缓释肥施用量的生长效应[J]. 东北林业大学学报，46(11)：12-15.]

RAO LS, LI M, DAI MJ, et al., 2021. Cloning and bioinformatics analysis of ClSAUR25 gene 5' flanking sequence in *Cunninghamia lanceolata*[J]. Mol Plant Breed, 19(4): 1107-1112. [饶丽莎，李茂，戴明金，等，2021. 杉木 ClSAUR25 基因 5'侧翼序列的克隆与生物信息学分析[J]. 分子植物育种，19(4)：1107-1112.]

REN YM, CHEN MJ, LI HT, et al., 2021. Effects of formula fertilization on species structure of large diameter wood in near mature forest of *Chinese fir*[J]. J For Environ, 41(1): 18-25. [任衍敏，陈敏健，李惠通，等，2021. 配方施肥对杉木近熟林大径材材种结构的影响[J]. 森林与环境学报，41(1)：18-25.]

SHANG B, 2017. Effects of slow-release fertilizer on the growth of container seedlings of *Cunninghamia lanceolata*[J]. J Sichuan For Sci Technol, 38(3): 93-94. [尚彬，2017. 缓释肥对杉木容器育苗生长的影响[J]. 四川林业科技，38(3)：93-94.]

SONG XH, GUO HH, LIU Y, et al., 2018. The growth response of *Pistacia chinensis* Bunge containerized seedlings to slow-release fertilizer[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 42(3): 117-122. [宋协海，郭欢欢，刘勇，等，2018. 黄连木容器苗生长对缓释肥的响应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，42(3)：117-122.]

TANG J, TANG YX, SU XH, et al., 2014. A study on photosynthetic physiological characteristics of *Populus deltoids* clones at seedling stage[J]. J Cent S Univ For Technol, 34(9): 12-16. [唐洁，玉喜，苏晓华，等，2014. 美洲黑杨无性系苗期光合生理特性研究[J]. 中南林业科技大学学报，34(9)：12-16.]
TAO WW, JIANG WW, ZHAO LJ, 2011. Chlorophyll fluorescence parameters in three cultivars of *Penstemon*[J]. J Zhejiang A & F Univ, 28(3): 367-371. [陶文文，蒋文伟，赵丽娟，2011. 3 个钓钟柳品种叶绿素荧光特性比较[J]. 浙江农林大学学报，28(3)：367-371.]
WANG Y, WANG XH, WU XL, et al., 2013. Effects of slow-release fertilizer loading on growth and construction of nutrients reserves of *Phoebe chekiangensis* and *Phoebe bournei* container seedlings[J]. Sci Silv Sin, 49(12): 57-63. [王艺，王秀花，吴小林，等，2013. 缓释肥加载对浙江楠和闽楠容器苗生长和养分库构建的影响[J]. 林业科学，49(12)：57-63.]
WANG YN, DONG LN, DING YF, et al., 2020. Effects of shading on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of four *Corydalis* species[J]. Chin J Appl Ecol, 31(3): 769-777. [王亚楠，董丽娜，丁彦芬，等，2020. 遮阴对 4 种紫堇属植物光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报，31(3)：769-777.]
WEI HX, XU CY, MA LY, et al., 2011. Eects of controlled-release fertilizer and organic amendment on the construction of nutrients reserves in *Larix olgensis container* seedlings[J]. Chin J Appl Ecol, 22(7): 1731-1736. [魏红旭，徐程扬，马履一，等，2011. 缓释肥和有机肥对长白落叶松容器苗养分库构建的影响[J]. 应用生态学报，22(7)：1731-1736.]
WEI N, LI GL, CAI MX, et al., 2021. Effects of slow-release fertilization rates on seedling quality and field survival rates of four exotic oaks[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 45(3): 53-60. [魏宁，李国雷，蔡梦雪，等，2021. 缓释肥施氮量对 4 种国外栎苗木质量及移栽成活率的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，45(3)：53-60.]
WU XL, ZHANG DB, CHU XL, et al., 2014. Effect of substrate ratio and slow-release fertilizer dose on the growth of containerized *Cyclobalanopsis gilva* seedlings[J]. For Res, 27(6): 794-800. [吴小林，张东北，楚秀丽，等，2014. 赤皮青冈容器苗不同基质配比和缓释肥施用量的生长效应[J]. 林业科学研究，27(6)：794-800.]
XIAO Y, CHU XL, WANG XH, et al., 2015. Effect of slow-release fertilizer loading on growth and N，P accumulation of container-growing seedlings for three precious tree species[J]. For Res, 28(6): 781-787. [肖遥，楚秀丽，王秀花，等，2015. 缓释肥加载对 3 种珍贵树种大规格容器苗生长和 N、P 库构建的影响[J]. 林业科学研究，2015，28(6)：781-787.]
XIE H, ZHANG W, HAN SA, et al., 2021. Effect of shading defree on the grain yield and photosynthetic characteristics of wheat at the grain filling stage in an almond-winter wheat intercropping system[J]. Chin J Eco-Agric, 29(4): 704-715. [谢辉，张雯，韩守安，等，2021. 扁桃-冬小麦间作系统树冠截光程度对小麦产量和灌浆期光合特性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文)，29(4)：704-715.]
YAN MM, WANG ML, WANG HB, et al., 2014. Effects of light quality on photosynthetic pigment contents and photosynthetic characteristics of peanut seedling leaves[J]. Chin J Appl Ecol, 25(2): 483-487. [闫萌萌，王铭伦，王洪波，等，2014. 光质对花生幼苗叶片光合色素含量及光合特性的影响[J]. 应用生态学报，25(2)：483-487.]
YAO GG, LI GL, ZHENG YL, et al., 2019. Effects of slow-release fertilizer rate on the quality of *Quercus aliena* container seedlings[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 43(1): 69-75. [姚光刚，李国雷，郑永林，等，2019. 缓释肥施用量对槲栎容器苗苗木质量的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，43(1)：69-75.]

YE YQ, LUO HY, LI M, et al., 2018. Effects of nitrogen forms on lateral roots development and photosynthetic characteristics in leaves of *Cunninghamia lanceolata* seedlings[J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 38(11): 2036-2044. [叶义全，罗红艳，李茂，等，2018. 氮素形态对杉木幼苗侧根生长和叶片光合特性的影响[J]. 西北植物学报，38(11)：2036-2044.]

YI H, 2019. Analysis on the growth and biomass of Chinese fir seedlings in different ways[J]. Anhui Agric Sci Bull, 25(24): 74-75. [伊昊，2019. 不同育苗方式对杉木苗木生长的影响研究[J]. 安徽农学通报，25(24)：74-75.]

ZHANG FX, XIE JM, YANG HX, et al., 2021. Effects of fertilizing slow-release fertilizer combined with bio-organic fertilizer on growth physiology, yield and quality of cabbage[J]. J Gansu Agric Univ, 56(6): 73-81. [张富鑫，颉建明，杨海兴，等，2021. 缓释肥配施生物有机肥对结球甘蓝生长生理、产量及品质的影响[J]. 甘肃农业大学学报，56(6)：73-81.]

ZHANG M, TANG SH, ZHANG FB, et al., 2017. Slow-release urea of 60-day-release period is suitable for one basal application in early and late rice[J]. J Plant Nutr Fert, 23(1): 119-127. [张木，唐拴虎，张发宝，等，2017. 60 天释放期缓释尿素可实现早稻和晚稻的一次性基施[J]. 植物营养与肥料学报，23(1)：19-127.]

ZHANG P, PANG SJ, LIU SL, et al., 2021. Effects of slow release fertilizer on growth of *Keteleeria fortune* seedlings cultured in container[J]. J NW A & F Univ (Nat Sci Ed), 49(9): 1-7. [张培，庞圣江，刘士玲，等，2021. 缓释肥对江南油杉容器苗生长的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，49(9)：92-98.]

ZHANG WQ, HUANG FF, GAN XH, et al., 2021. Effects of fertilization on the growth and photosynthetic characteristics of *Heritiera littoralis* seedlings[J]. Guihaia, 41(6): 862-871. [张卫强，黄芳芳，甘先华，等，2021. 施肥对银叶树幼苗生长及光合特性的影响[J]. 广西植物，41(6)：862-871.]

ZHOU L, WU DY, LV QS, et al., 2022. Morphology and biomass differentiations of fine roots in *Pinus massoniana* plantation infected by *Bursaphelenchus xylophilus*[J]. Acta Ecol Sin, 42(15): 1-13. [周岚，巫大宇，吕秋实，等，2022. 松材线虫侵染的马尾松人工林细根形态及生物量分异特征[J]. 生态学报，42(15)：1-13.]

ZHOU XH, YAN YQ, XIAO ZY, et al., 2017. Influences of growth substrate ratio, container size and SRF on *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook container seedling[J]. Acta Agric Univ Jiangxi, 39(1): 72-81. [周新华，月桥，肖智勇，等，2017. 基质配比、容器规格和缓释肥量对杉木容器育苗的影响[J]. 江西农业大学学报，39(1)：72-81.]

ZHU H, LUO HY, LI Y, et al., 2018. Effect of planting density on the growth of cutting seedlings of a superior *Chinese fir* (*Cunninghamia lanceolata*) clone[J]. Subtrop Agric Res, 14(4): 236-241. [朱晗，罗红艳，李勇，等，2018. 扦插密度对杉木优良无性系扦插苗生长的影响[J]. 亚热带农业研究，14(4)：236-241.]